

SHPB 기법을 이용한 A16061-T6의 고속 인장 변형거동 규명

이억섭* · 김관희** · 황시원***
(2000년 4월 22일 접수)

Determination of Deformation Behavior of the Al6061-T6 under high Strain Rate Tensile Loading Using SHPB Technique

Ouk Sun Lee, Guan Hee Kim and Si Won Hwang

Key Words: Split Hopkinson Pressure Bar Technique(SHPB 기법), High Strain Rate(고 변형률 속도), Stress Wave(응력파), Dynamic Stress-Strain Curve(동적 응력-변형률 곡선), Tensile Loading(인장 하중), Deformation Behavior(변형 거동), Snug Fit(정교한 접촉), Spurious Wave(의사 인장파)

Abstract

Mechanical properties of the materials used for transportations and industrial machinery under high strain rate loading conditions have been required to provide appropriate safety assessment to these mechanical structures. The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique with a special experimental apparatus can be used to obtain the material properties under high strain rate loading condition. There have been many studies on the material behavior under high strain rate compressive loading compare to those under tensile loading. In this paper, mechanical properties of the aluminum alloy, Al6061-T6, under high strain rate tensile loading were determined using SHPB technique.

1. 서론

고 변형률 속도 하에서의 인장 실험은 저 변형률 속도 하에서의 인장 실험과는 분명하게 구분되어져야 한다. 저 변형률 속도 하에서의 인장 실험에서는 시편의 변형 속도가 매우 느려 관성의 영향을 무시할 수 있으나 고 변형률 속도 하에서는 관성에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문이다.

동적 실험에서 관성은 다음의 3가지 영향을 나타낸다.⁽¹⁾ 첫 번째로 관성은 어떠한 조건하에서는 무시할 수 있는 반경 방향의 성분을 나타나게 한다. 두 번째로 실험 초기에 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미친다.

저 변형률 하중 하에서의 변형은 시간에 대한 질점의 속도가 무시할 정도로 작고, 실험 시간이 매우 길기 때문에 질점의 가속도나 탄성파의 전파 속도를 무시할 수 있다. 이러한 사실은 시편의 전 표점 거리에 걸쳐서 길이 방향의 하중이 일정하여 준 정적 평형 가정을 뒷받침해준다. 결

* 회원, 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

E-mail : leeos@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716

** 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 동양대학교 기계 설계학과

론적으로 시편의 변형은 균일하다. 그러나 이러한 조건은 고 변형률 하중 하에서는 더 이상 만족되지 않는다. 최근 기계 구조물들은 높은 응력과 순간에 작용하는 하중에 의해 특징지어지는 극한 작업 환경에서 사용되어지고 있다. 그리고 단조, 압연과 같은 가공 공정들은 고 변형률 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 구조물이나 작업환경에 대한 최적의 설계를 하기 위해서는 고 변형률 하중 조건하에서의 물리적·기계적 재료 특성에 대한 광범위한 정보가 요구된다. 이러한 문제에 대한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고, 동적 실험에 대한 실험적 데이터의 부족과, 동적 하중 하에서 사용되는 구조물의 재료로 쓰이는 신 소재의 계속적인 개발에 의해 아직도 많은 연구가 필요하다. 변형률 속도가 $10^2 \sim 10^3/s$ 이상의 고 변형률 속도 하에서의 기계적 거동을 측정하기 위해 최근에 가장 널리 쓰이고 있는 방법은 split Hopkinson pressure bar (SHPB) 기법이다.⁽²⁾ 이 방법은 1949년 Kolsky⁽³⁾에 의해 현재 사용되고 있는 장비가 개발된 이후 많은 발전을 거듭하였다. 초기에 주로 압축 실험에 사용되던 SHPB 기법을 인장 실험에 처음 사용하기 시작한 것은 Harding, Wood과 Campbell⁽⁴⁾이었다. 이후 더 간단한 실험방법과 정확한 데이터를 얻기 위해 실험 장비에도 많은 발전을 보였다. 본 연구에 사용된 SHPB 기법은 Nicholas scheme⁽⁵⁾을 따른 것으로, 두 개의 긴 봉 사이에 나사를 낸 시편을 split ring을 사용해서 장치하는 방법이다.

본 연구에서는 높은 강도, 좋은 용접성, 높은 부식 저항성이 있어 파이프, 대포, 수송 장비, 평저 보트 등에 사용되는데⁽⁶⁾ 알루미늄 합금인 Al6061-T6 에 대해 고 변형률 인장 하중 하에서의 거동을 규명하였다.

2. 2장 이론

2.1 기본가정 및 이론

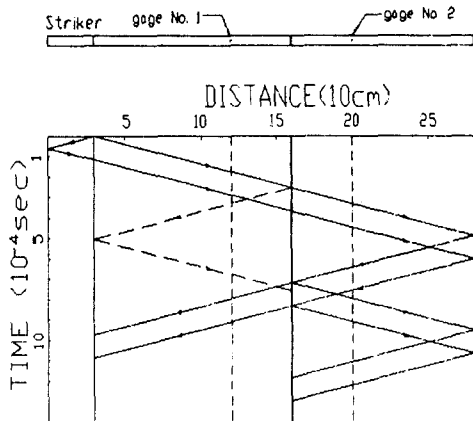
봉끼리의 완전 접촉조건, 길이방향과 반경방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽⁷⁾와 Chree⁽⁸⁾ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과가 SHPB 기법에 응용되었고, 응력과 가

파장 λ 인 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R:봉의 반경)일 때 응력과에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다. 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 성질은 축 방향으로의 응력과 전파속도는 그 파장(wave length)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 약 영향을 끼치게 되므로 유의해야 한다.

2.2 SHPB 실험방법에 의한 응력-변형률 결정

입력봉(incident bar), 출력봉(transmitted bar), 충격봉(striker bar) 등으로 구성되어 있는 기존 SHPB에서는 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 위치시킨다. 충격봉이 V 의 속도로 입력봉에 충돌하게 되면 밀도가 ρ_0 인 입력봉에는 $\rho_0 C_0 V/2$ 의 크기를 갖는 응력파가 발생하게 되고 이 응력파는 시편과 split ring의 복합 단면(composite section)을 거쳐 출력봉으로 전파된다. 이때 입력봉과 출력봉은 탄성한도 내에 있도록 충격봉의 속도가 조절되지만 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스의 차이에 의하여 탄성 및 소성 변형을 하게 된다. 입력봉 및 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어지는 신호와 봉 내의 1차원 탄성과 전파 이론으로부터 시간에 따른 하중과 변형률을 결정할 수 있다. Fig. 1에 인장 SHPB 실험에서 입력봉 및 출력봉에서의 탄성과 전파 형상을 나타내었다. 충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생된 압축 응력파는 본질적으로는 분산되지 않고 시편과 split ring의 복합 단면을 통과한다. 이때 split ring과 입력봉 및 출력봉 사이의 완벽한 접촉 정도, split ring의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비가 클수록 시편을 통해 탄성 범위를 넘어서는 어떠한 압축파도 전달되지 않는다는 조건이 확실해진다.⁽⁹⁾ 결론적으로 모든 압축파가 시편이 존재하지 않는 경우와 마찬가지로 split ring을 통해 전달된다

Fig. 1에 나타낸 것처럼 입력봉에 발생된 압축 응력파는 출력봉의 자유단에 도달 할 때까지 계속 전파된다.



ϵ_I : incident strain, ϵ_R : reflected strain, ϵ_T : transmitted strain

Fig. 1 A schematic diagram of elastic stress waves for the SHPB test (the subscript I, R, and T refer to the incident, reflected and transmitted pulses, respectively)

출력봉의 자유단에 도달한 압축 응력파는 다시 출력봉으로 인장파(ϵ_I)의 형태로 반사되어 게이지 No. 2에 기록된다. 시편에 도달한 인장파의 일부는 입력봉으로 ϵ_T 의 형태로 전달되고, 나머지는 다시 출력봉으로 ϵ_R 의 형태로 반사된다. 시편에서의 인장응력을 계산하는데 사용되는 인장파(ϵ_T)가 입력봉으로 전달 될 때 입력봉과 split ring사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파(spurious wave)가 ϵ_T 와 간섭이 발생되지 않도록 스트레인게이지를 위치시켜야한다. Fig. 1에 점선으로 표시된 부분이 입력봉과 split ring 사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파이다. 의사 인장파는 시편에 예비 인장을 가하여 시편에 나쁜 영향을 미치지않지만, 현재 고속 인장 응력을 구하기 위한 SHPB 기법에서는 불가피한 현상이다. 그러나 의사 인장파의 진폭은 Fig. 3에서 보이듯이 매우 작으므로 시편에 큰 영향을 미치지않는다. 입력봉과 출력봉 사이의 split ring은 두 봉의 어느 쪽에도 연결되어 있지 않기 때문에 어떠한

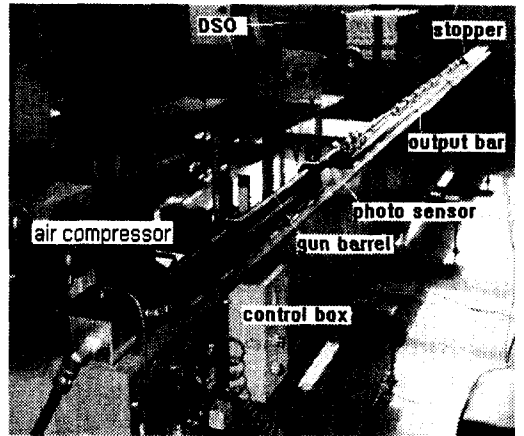


Photo. 1 General view of SHPB experimental apparatus

인장하중에도 영향을 미치지 못한다. split ring과 입력봉 및 출력봉의 정교한 연결은 압축과가 어떠한 형태의 분산없이 봉으로 전파되기 위한 매우 중요한 조건이다. 그리고 인장과가 시편에 도달했을 때 빠르고 완만한 하중을 얻기 위해서는 나사 가공된 시편이 봉에 정교하게 연결되어야 한다.⁽¹⁰⁾ 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{\text{시편}} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_T \tag{1}$$

$$\epsilon_{\text{시편}} = - \frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_{Rd} dt \tag{2}$$

여기서 E, A와 C_0 는 각각 봉의 탄성계수, 봉의 단면적 및 봉에서의 종탄성파 속도를 나타내고, L과 A_s 는 각각 시편의 게이지 길이와 단면적을, t는 반사파의 duration time을 나타낸다.

3. 3장 실험 방법

3.1 하중 장치 및 충격봉

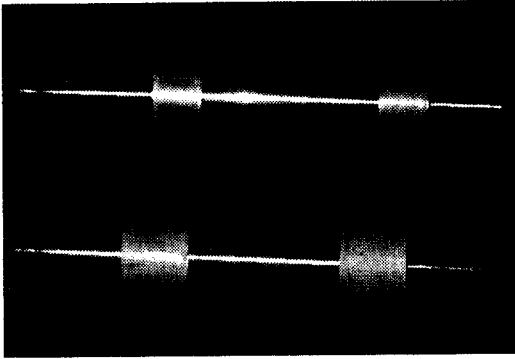


Photo. 2 Geometry of strikers

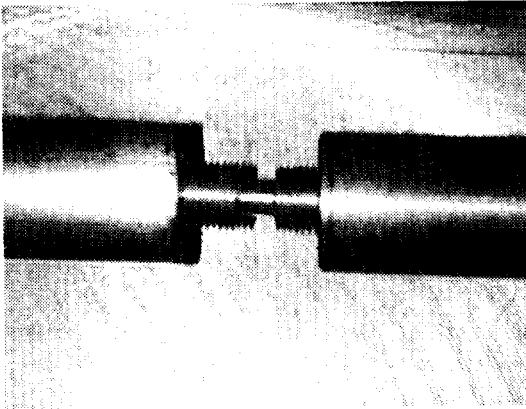


Photo. 3 Specimen set between two bars

$10^2 \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도를 발생시키기 위한 충격하중을 주는 장치는 공기압을 이용하여 충격봉을 발사할 수 있도록 설계, 제작되었으며 충격봉, 입력봉 및 출력봉이 탄성한계를 벗어나지 않도록 충격속도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 각 봉의 소재로 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있으며 강도가 높은 고 탄소 크롬강을 사용하였다. 충격봉의 길이는 300mm로 제작하였고, 직경은 압력봉과 같은 16mm이다. SHPB 실험장치의 전체적인 모양과 여러 가지 형태의 충격봉을 Photo. 1과 2에 나타내었다.

3.2 입력봉 및 출력봉

시편의 변형률의 크기는 응력파의 파장과 관계가 있고 입력파와 반사파를 독립적으로 측정하기

위해서는 봉의 길이는 최소한 봉에서의 응력파 파장의 2배 이상이어야 한다. 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질이며 직경 역시 충격봉과 같이 16mm로 하였다. 각 봉에는 시편을 고정시킬 수 있도록 나사산을 가공하였다. 입력봉 및 출력봉에 나사산을 가공할 때 시편을 한 방향으로 돌려서 각각의 봉에 장치하여야 하므로 한 쪽은 오른쪽 나사로 다른 쪽은 왼쪽 나사로 가공하였다. 또한 각 봉의 끝단은 계속적인 충격하중에 의한 변형을 방지하기 위해 고주파 열처리를 하였다.

입력봉 및 출력봉의 길이는 시편의 인장변형 과정에서 기록된 유효신호($\epsilon_R, \epsilon_T, \epsilon_f$)와 의사 인장파(spurious wave) 사이에 간섭이 발생되지 않는 길이로 선택되었다. Fig. 1에 나타났듯이 충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생된 압축 응력파는 출력봉의 끝단에서 인장파가 반사되어 도달하기 전에 스트레인게이지 No. 2를 통과한다. 그리고 입력파(ϵ_f)는 반사파가 스트레인게이지 No. 2를 통과하기 이전에 스트레인게이지 No. 2를 통과한다. Photo. 3은 시편을 봉에 장치하였을 때의 모습을 나타낸다.

3.3 직진도 유지장치

실험 장치에서 중요한 요소 중 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전달되도록 하는 것이다. 직진도가 유지되지 못하면 시편을 각 압력봉에 장치할 때 매우 곤란할 뿐만 아니라 시편에 비틀림 또는 진단하중을 가하는 나쁜 영향이 발생한다.

직진도를 유지하기 위해서 I 빔을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생하는 응력파의 크기는 $\rho_0 C_0 V/2$ 로 계산되므로 응력파의 크기를 알기 위해 충격봉의 속도를 측정하여야 한다. 여기서, ρ_0 는 충격봉의 밀도, C_0 는 종단성파의 속도, V 는 충격봉의 속도를 나타낸다.

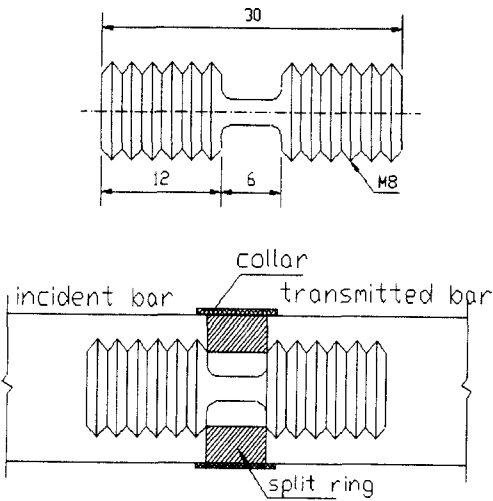


Fig. 2 Specimen geometry and specimen setting between incident and transmitted bars

충격봉의 속도를 측정하기 위해 충격봉이 지나가는 경로에 50mm 간격으로 3개의 광 센서를 설치하였다. 충격봉에 의해 광 센서의 빛이 차단되는 순간이 전기적 신호에 의해 오실로스코프(oscilloscope ; Nicolet 410)에 감지되도록 하였으며 충돌시의 속도를 정밀하게 검출하기 위해 입력봉 앞부분에 설치하였다. 응력파(ϵ_I , ϵ_T , ϵ_R)를 검출하기 위해 입력봉과 출력봉에 스트레인게이지들을 부착하였다. 스트레인게이지들은 split ring과의 접촉면으로부터 각각 400mm 되는 거리에 부착시켰다. 스트레인게이지를 각 봉에 부착할 때에는 각각의 유효신호가 서로 간섭되지 않고 기록될 수 있는 위치에 부착하는 것이 중요하다. 봉의 길이방향의 응력파의 시간에 따른 변화는 스트레인게이지에 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)회로에 의해 전압변화로 나타나게 된다. 이러한 전압의 미세한 변화는 증폭기(amplifier)를 거쳐서 오실로스코프(digital storage oscilloscope ; Lecroy 9354A)에 기록되게 된다.

3.5 시편 및 split ring

본 연구에 사용된 시편의 재료는 상용 알루미늄 합금인 A16061-T6이다. 시편의 전체 길이는 30mm이며, 양 끝 12mm의 길이에는 나사 가공을

하여 시편을 봉에 고정시킬 수 있게 하였다. 나사 가공을 할 때에는 봉에 시편을 장착할 때의 편의를 위해 한쪽은 왼 나사, 다른 쪽은 오른 나사로 가공하였다. 시편의 게이지 길이는 6mm이며 이 부분의 지름은 4mm이다. split ring의 단면적에 대한 압력봉의 단면적의 비는 3:4이다. 그리고 split ring의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비는 12:1이다. 이러한 형상은 초기 압축파가 시편에 어떠한 소성변형을 가하지 않고 온전히 출력봉으로 전달될 수 있는 조건이다.⁽⁵⁾ 입력봉에 발생된 초기 압축파가 출력봉에 완벽하게 전달될 수 있도록 입력봉과 출력봉 사이에 장치하는 split ring은 외경 16mm, 두께 6mm로 하였으며, 내경은 시편이 split ring과 마찰을 일으키지 않고 움직일 수 있는 최소의 크기로 하였다. split ring은 각 봉과 같은 재질을 사용하였고 입력봉, split ring, 출력봉의 일직선 정렬을 위해 collar를 사용하였다.

Fig. 2에 시편의 형상 및 collar를 사용해 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 장치된 형상을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3에 SHPB시험에서 입력봉과 출력봉에 부착한 스트레인게이지로부터 얻어진 응력파의 전형적인 형태를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 출력봉에서 검출되는 인장파는 초기 압축파와 매우 유사한 형태이고 단지 그 부호만이 바뀌었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출되는 입력파, 반사파의 진폭 및 형상이 똑같아야 하나 실제 검출된 신호를 보면 점차 감쇠됨을 알 수 있다. 이러한 문제점은 보다 신뢰도가 높은 데이터를 얻기 위해 보강되어야 한다.

Fig. 4에 SHPB실험을 통해 얻어진 동적 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시편의 최대 인장강도(ultimate tensile strength)는 변형률 속도에 의해 영향을 크게 받지는 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6에는 각각 변형률 속도에 대한 항복강도, 변형률

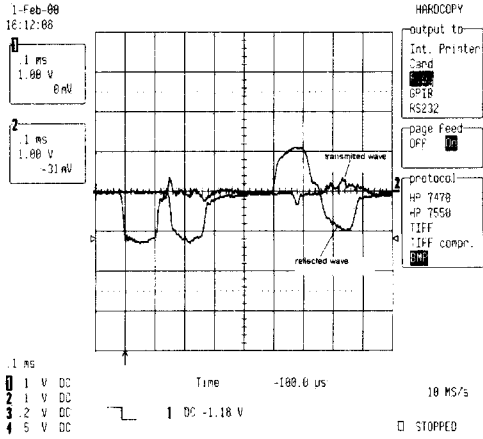


Fig. 3 General view of the signal obtained by the strain gage No. 1 and No. 2

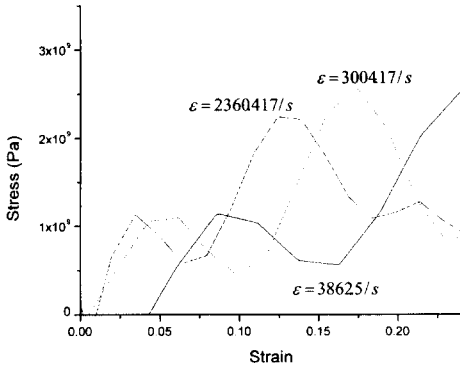


Fig. 4 Dynamic stress-strain curves obtained for aluminum alloy, Al6061-T6

속도의 log scale에 대한 항복강도를 나타내었다. Fig. 5에는 참고문헌 2에서 인용한 정적 항복강도 값 279.4MPa이 함께 나타나 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 2800 ~ 3300/s 사이의 변형률 속도에서는 항복강도가 약간은 상승하나 크게 변하지는 않는 사실을 알 수 있다. 그러나 이 범위 이상의 변형률 속도에서는 항복강도가 급격히 상승함을 알 수 있다.

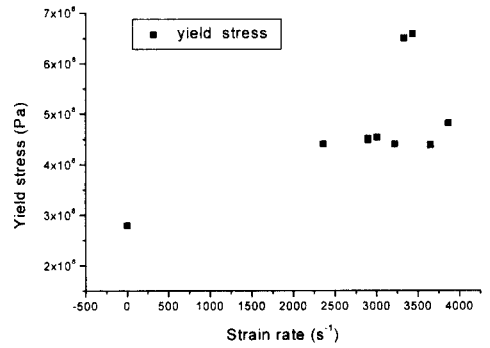


Fig. 5 Dynamic strain rate versus yield stress

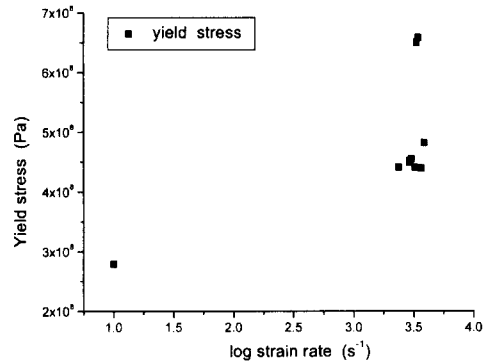


Fig. 6 Yield stress versus log scale of strain rate

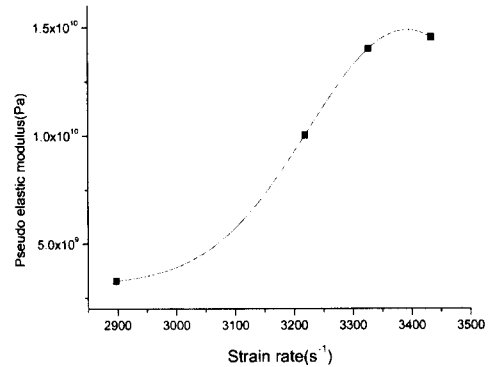


Fig. 7 Dynamic pseudo elastic modulus versus strain rate curve

Fig. 7에는 변형률 속도에 따른 동적 의사 탄성 계수(Dynamic pseudo elastic modulus)를 나타내었다. 동적 의사 탄성계수는 변형률 속도에 따라 어느 정도 까지는 점차적으로 증가하나 실제 A16061-T6의 탄성계수 69.85GPa보다는 현저히 낮음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 SHPB 기법은 시편내의 유동 응력(flow stress)을 측정하는데는 적당하나 SHPB 기법으로 측정된 동적 의사 탄성계수는 그 신뢰도가 낮음을 알 수 있다. 이것은 실험초기에 시편 상태가 매우 불안정하기 때문이며 이러한 단점을 보완하여 신뢰도가 높은 데이터를 얻기 위한 노력이 다방면에 걸쳐 이루어지고 있다.

5. 결론

SHPB 기법을 이용한 A16061-T6의 고속 인장 하중 하에서의 변형 거동을 규명하기 위한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고속 인장 하중 하에서 A16061-T6의 항복강도는 변형률 속도의 차수가 10^3 이상의 범위에서는 변형률 속도에 민감하게 영향을 받는다.
- (2) SHPB 기법에 의해 얻어진 A16061-T6의 동적 의사 탄성계수(Dynamic pseudo elastic modulus)는 참고 문헌 2에 나타나 있는 탄성계수에 비해 매우 낮았다. Conventional SHPB 기법에 의하여 측정된 재료의 동적 의사 탄성계수는 그 신뢰도가 낮았다.
- (3) A16061-T6의 항복강도는 변형률 속도의 log scale에 대해 bilinear한 형상을 갖는다.

참고문헌

- (1) Regazzoni, G. and Follansbee, P. S., 1986, "Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 53, pp. 519~520.
 - (2) Ouk Sub Lee, Seung Suk Lee, Ju Ho Chung and Hee Soo Kang, 1998, "Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149.
 - (3) Kolsky, H., 1949 "An Investigation of the Mechanical Properties of Material at Very High Rates of Loading," *Proc. Phys. Soc.* B62, pp. 679~699.
 - (4) Harding, J., Wood, E. O., and Campbell, J. D., 1960, "Tensile Testing of Material at Impact Rates of Strain," *J. Mech. Eng.* pp. 88~96.
 - (5) Nicholas, T., 1981, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain," *Exp. Mech.* 21 pp. 177~186.
 - (6) American Society for Metals HandBook 8th edition, Vol. 1, pp. 947~948.
 - (7) Pochhammer, L., 1876, "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," *J. Reine Angewandte Math.*, Vol. 81, p. 324.
 - (8) Chree, C., 1889, "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications," *Cambridge Phil. Soc. Trans.* Vol. 14, p. 250.
 - (9) Nguyen, C. H. and Schindler, H. J., 1997, "On Spurious reflection Waves in Hopkinson Bar Tensile Tests Using a Collar," *Journal DE Physique IV*, pp. C3-85~C3-87.
 - (10) Nicholas, T., 1981, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain," *Experimental Mechanics*, pp. 179~180.
- (1) Regazzoni, G. and Follansbee, P. S., 1986,